

# **Nachhaltige Energieversorgung**

## **Anmerkungen zum Nachhaltigkeitskonzept und seiner Umsetzung im Energiebereich?**

Prof. Dr.-Ing. Alfred Voß

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER)  
Universität Stuttgart  
[www.ier.uni-stuttgart.de](http://www.ier.uni-stuttgart.de)

**Econsense**

**6. Dezember 2002**

- Konkretisierung des Nachhaltigkeitsbegriffs für den Energiebereich
- Stromerzeugungssysteme auf dem Prüfstand der Nachhaltigkeit
- Nachhaltige Entwicklung als Gestaltungsprozess und wirtschaftlicher Ordnungsrahmen
- Nachhaltige Energieversorgung Deutschlands: Szenarien der Enquete-Kommission

## Nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development)

### **Brundtland Kommission:**

„Nachhaltige Entwicklung“ ist eine „Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können“.

### **Ziel**

Die Verbesserung der ökonomischen und sozialen Lebensbedingungen aller Menschen, der heute und zukünftig lebenden, mit der langfristigen Sicherung der natürlichen Lebensgrundlage in Einklang zu bringen.

## **Nachhaltigkeit – eine umfassende Sicht**

**Im Verständnis der Rio-Deklaration, wie auch der Brundtland-Kommission, beinhaltet das Leitbild „nachhaltig zukunftsfähige Entwicklung“ die Forderungen**

- **nach schonender Nutzung und Erhaltung der natürlichen Lebensgrundlagen (Life-Support-Systems),**
- **nach wirtschaftlicher Entwicklung und**
- **nach sozialer Entwicklung**

**Diese drei Forderungen werden auch als die drei Dimensionen – Ökonomie, Ökologie und Gesellschaft – einer nachhaltig zukunftsfähigen Entwicklung bezeichnet.**

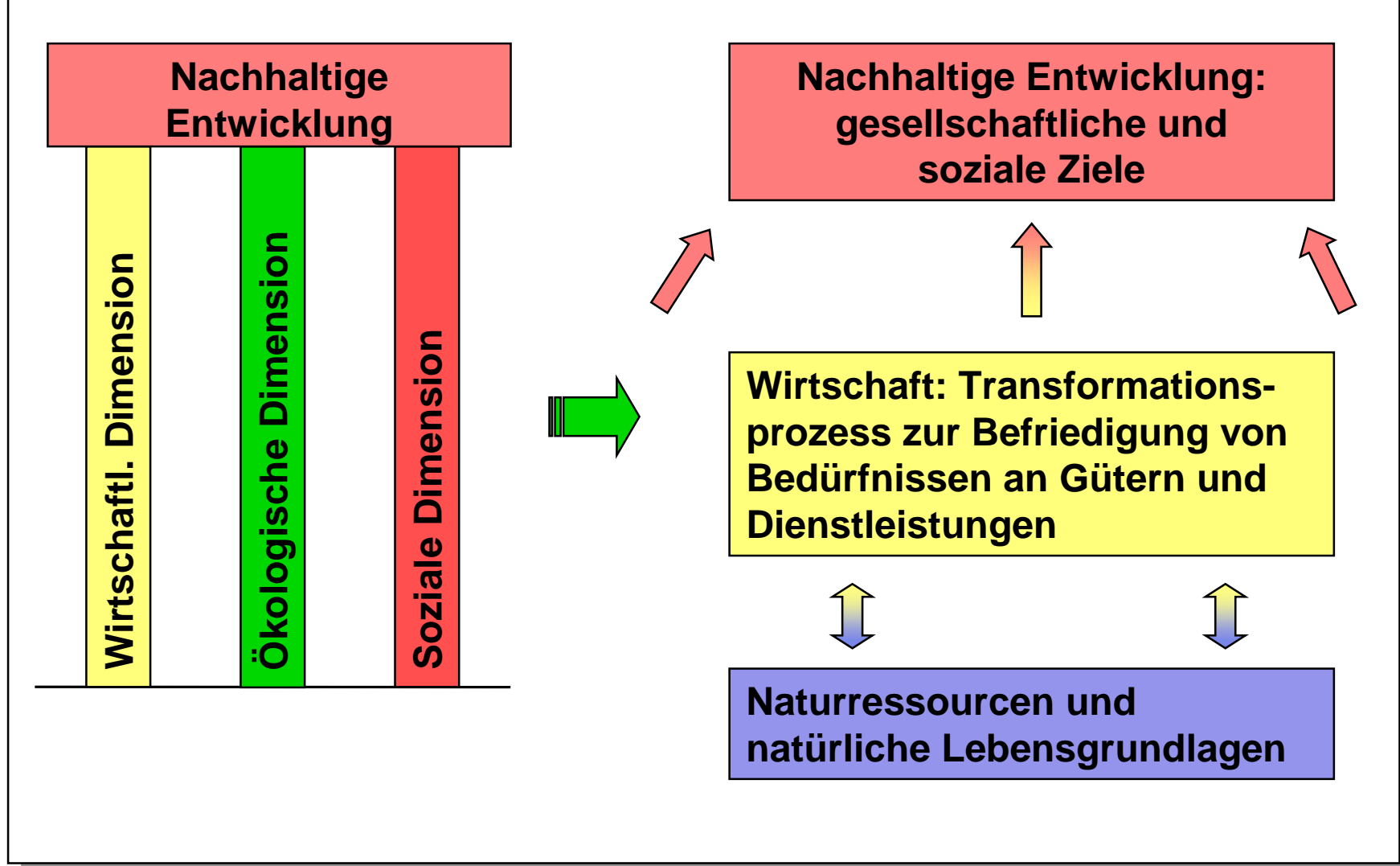
## ➤ **Nachhaltige Entwicklung - Konkretisierung des Leitbildes für den Energiebereich**

- Naturwissenschaftliche Grundlagen -  
Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik
- Nachhaltige Energieversorgung und die Nutzung erschöpfbarer Energievorräte
- Energie und die Senkenfunktion der Umwelt
- Nachhaltige Entwicklung und das allgemeine ökonomische Prinzip

## Orientierungs- und Handlungsregeln

1. Die Nutzung erneuerbarer Ressourcen darf auf Dauer nicht größer sein als ihre Regenerationsrate.
2. Nicht-erneuerbare Energieträger und Rohstoffe sollen nur in dem Umfang genutzt werden, in dem ein physisch und funktionell gleichwertiger wirtschaftlich nutzbarer Ersatz verfügbar gemacht wird, in Form neu erschlossener Vorräte, erneuerbarer Ressourcen oder einer höheren Produktivität der Ressourcen.
3. Stoffeinträge in die Umwelt dürfen auf Dauer die Aufnahmekapazität bzw. Assimilationsfähigkeit der natürlichen Umwelt nicht überschreiten.
4. Die Gefahren und Risiken der Bereitstellung von Energiedienstleistungen für die menschliche Gesundheit müssen kleiner sein als die durch sie vermiedenen natürlichen Risiken.
5. Die Bereitstellung von Energiedienstleistungen soll zu möglichst geringen gesamtwirtschaftlichen Kosten (private plus externe Kosten) erfolgen.

## Konzept Nachhaltigkeit



## Nachhaltigkeitsindikatoren: Betrachtete Wirkungsbereiche

Dimension	Wirkungsbereich	
ökologisch	Ressourceninanspruchnahme	
	Klimabeeinflussung	
	Versauerung / Eutrophierung	
	Abfallaufkommen	
	Flächeninanspruchnahme	
sozial	Gesundheitsauswirkungen	Öffentliche Gesundheitsrisiken
		berufliche Gesundheitsrisiken
ökonomisch	Kosten	betriebswirtschaftliche Kosten
		externe Kosten
		gesamtwirtschaftliche Kosten



**Nachhaltigkeitsindikatoren (1/2)**

Dimension	Wirkungsbereiche	Indikator	Einheit je Energieeinheit
ökologisch	Ressourceninanspruchnahme	erschöpfbare Energieträger	J bzw. kWh
		Aufwendungen an Kupfererz	kg
		Aufwendungen an Bauxit	kg
		Aufwendungen an Eisenerz	kg
	Klima- beeinflussung	Treibhauspotenzial	kg CO <sub>2</sub> – Äquivalente
	Versauerung / Eutrophierung	Versauerungspotenzial	kg SO <sub>2</sub> –Äqu.
		Eutrophierungspotenzial	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> –Äqu.
	Abfall	n.-rad. Haus und Produktionsabfall	kg
		n.-rad. Bauabfall	kg
		n.-rad. Sonderabfall	kg
		rad. wärmeentwickelnder Abfall	m <sup>3</sup>
	rad. nicht-wärmeentwickelnder Abfall	m <sup>3</sup>	

## Nachhaltigkeitsindikatoren (2/2)

Dimension	Wirkungsbereiche	Indikator	Einheit je Energieeinheit
sozial	Gesundheitsauswirkungen	öffentliche Gesundheitsrisiken	YOLL (years of life lost)
		berufliche Gesundheitsrisiken	YOLL
ökonomisch	Kosten	externe Kosten	€
		betriebswirtschaftliche Kosten	€
		gesamtwirtschaftliche Kosten	€

- **Stromerzeugungssysteme auf dem Prüfstand der Nachhaltigkeit**

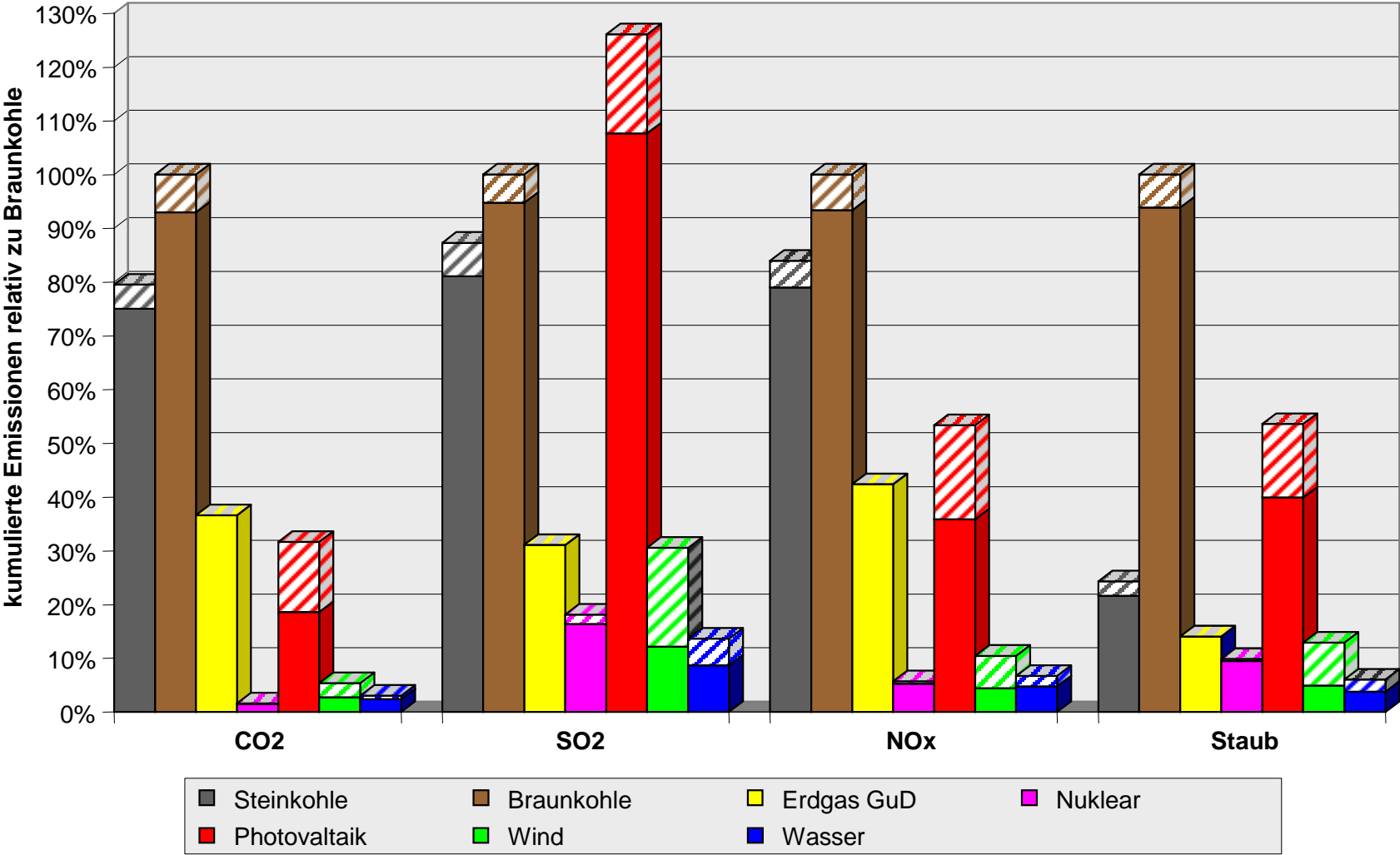
## Kumulierter Energieaufwand und energetische Amortisationszeit

	<b>KEA</b> (ohne Brennstoff) [kWh <sub>Prim</sub> / kWh <sub>el</sub> ]	<b>EAZ</b> [Monate]
<b>Steinkohle D</b>	0,28 - 0,30	3,2 - 3,6
<b>Braunkohle</b>	0,16 - 0,17	2,7 - 3,3
<b>Erdgas GuD</b>	0,17	0,8
<b>Nuklear</b>	0,07 - 0,08	2,9 - 3,4
<b>Photovoltaik</b>	0,62 - 1,24	71 - 141
<b>Wind</b>	0,05 - 0,15	4,6 - 13,7
<b>Wasser</b>	0,03 - 0,05	8,2 - 13,7

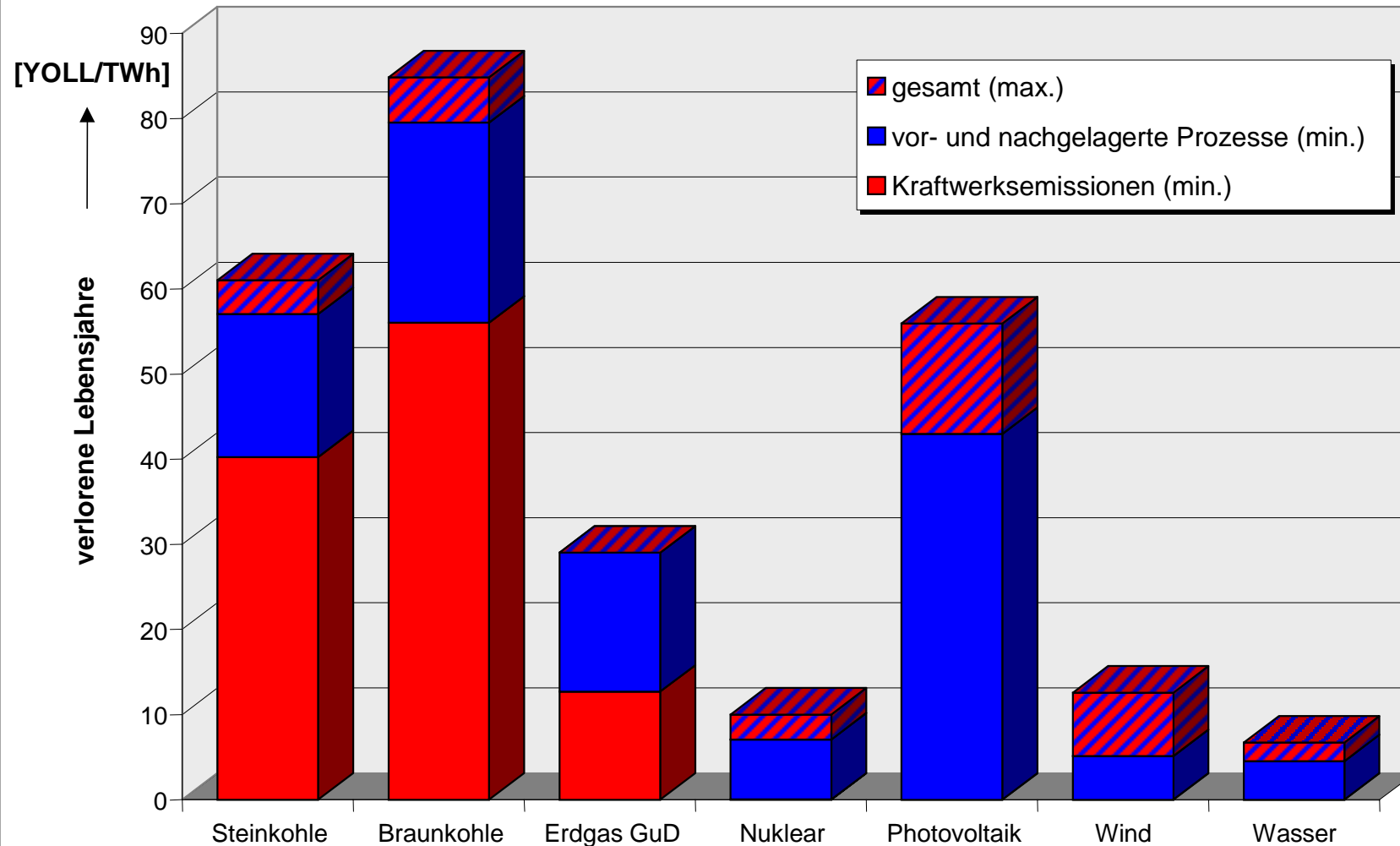
## Gesamter Rohstoff- und Materialaufwand

	<b>Eisen</b> [kg / GWh <sub>el</sub> ]	<b>Kupfer</b> [kg / GWh <sub>el</sub> ]	<b>Bauxit</b> [kg / GWh <sub>el</sub> ]
<b>Steinkohle D</b>	1.750 - 2310	2	16 - 20
<b>Braunkohle</b>	2.100 - 2.170	7 - 8	18 - 19
<b>Erdgas GuD</b>	1.207	3	28
<b>Nuklear</b>	420 - 490	6 - 7	27 - 30
<b>Photovoltaik</b>	3.690 - 24.250	210 - 510	240 - 4.620
<b>Wind</b>	3.700 - 11.140	47 - 140	32 - 95
<b>Wasser</b>	1.560 - 2.680	5 - 14	4 - 11

### Kumulierte Emissionen



## Gesundheitsrisiken \*)



\*) durchschnittliche spezifische Gesundheitsrisiken für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland

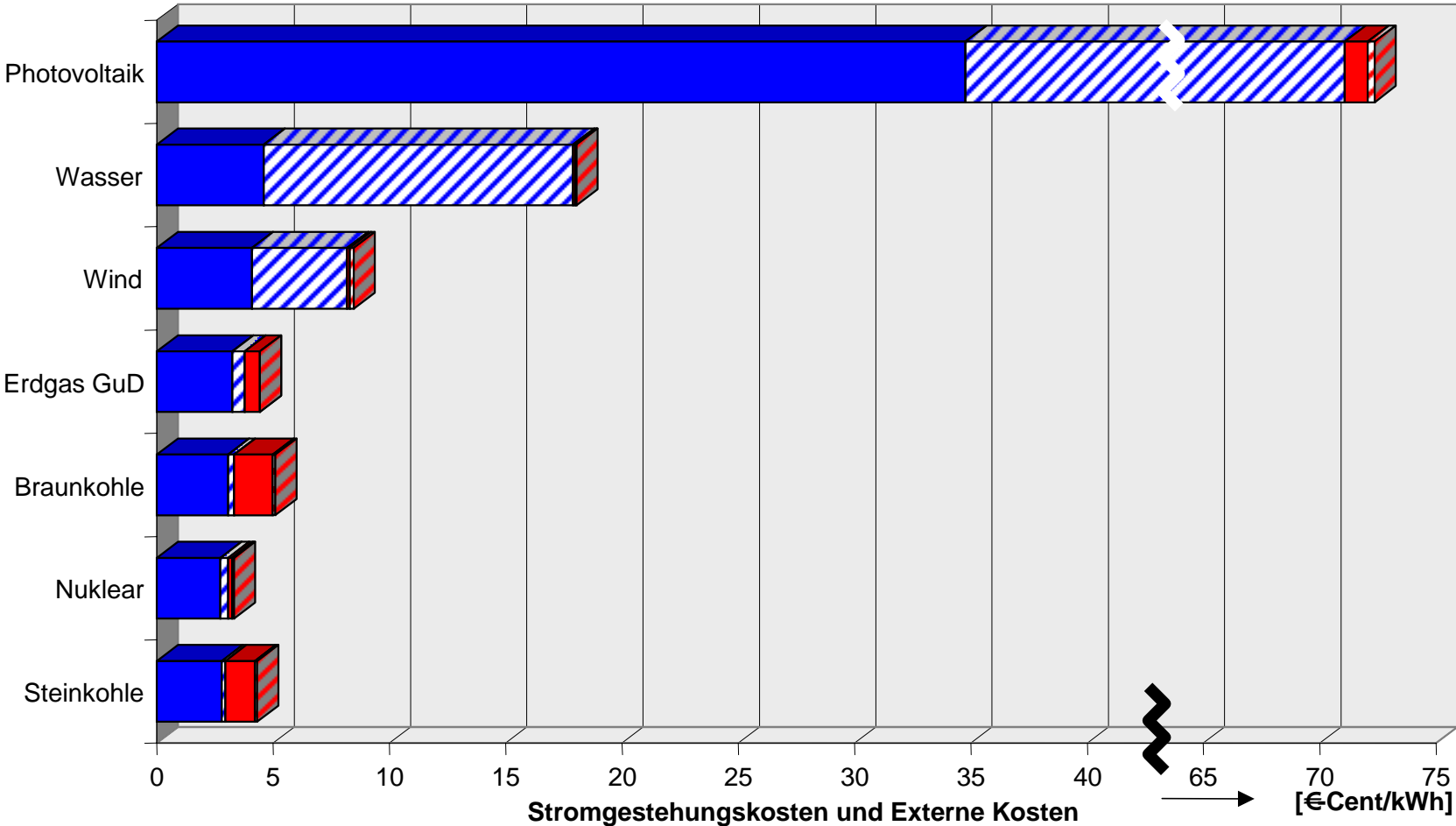
## Externe Kosten \*)

[€Cent/kWh]	Steinkohle	Braun- kohle	Erdgas GuD	Nuklear	Photo- voltaik	Wind	Wasser
<b>Schadenskosten<sup>1)</sup></b>							
Gesundheit	0,81 - 0,87	1,13 - 1,20	0,41	0,10 - 0,11	0,61 - 0,79	0,07 - 0,18	0,06 - 0,10
Getreide	0,01 - 0,02	-0,002	0,031	0,000	-0,003	-0,001	0,000
Material	0,01	0,01 - 0,02	0,006	0,002	0,01	0,002	0,001
Treibhauseffekt	0,19 - 0,20	0,24 - 0,25	0,09	0,004	0,05 - 0,08	0,01	0,007
<b>Vermeidungskosten<sup>2)</sup></b>							
Vers., Eutroph.	0,44 - 0,47	0,52 - 0,55	0,20	0,06	0,39 - 0,48	0,04 - 0,11	0,04 - 0,06
Treibhauseffekt	1,50 - 1,59	1,86 - 2,00	0,73	0,03	0,37 - 0,63	0,06 - 0,11	0,05 - 0,06
<b>Gesamt</b>	<b>1,45 - 2,96</b>	<b>1,89 - 3,77</b>	<b>0,74 - 1,38</b>	<b>0,16 - 0,29</b>	<b>1,05 - 1,92</b>	<b>0,13 - 0,40</b>	<b>0,11 - 0,21</b>
1) durchschnittliche spezifische Schadenskosten für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland 2) nach Standard-Preis-Ansatz							

\*) durchschnittliche spezifische Externe Kosten für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland



### Gestehungskosten und Externe Kosten der Stromerzeugung



■ Stromgestehungskosten (min.)      ▨ Stromgestehungskosten (max.)  
■ Externe Kosten ohne Klimaschäden (min.)      ▨ Externe Kosten ohne Klimaschäden (max.)

## **Nachhaltige Entwicklung als Gestaltungsaufgabe und wirtschaftlicher Ordnungsrahmen**

- Effiziente Nutzung knapper Ressourcen als konstitutives Element von Nachhaltigkeit  $\Rightarrow$  Nutzung der preisgesteuerten Allokationsmechanismen von Märkten
- Externe Umwelteffekte sind Folge fehlender Märkte für Umweltgüter
- Vollkosten als Maß für die Inanspruchnahme von knappen Ressourcen sprechen für funktionierende Märkte als Steuerungsinstrument
- Paradigmenwechsel in der Energiepolitik notwendig.

## Handlungsfelder der Energiepolitik

- Schaffung und Sicherung funktionierender Märkte
- Verursachungsgerechte Internalisierung externer Kosten durch marktgemäße Instrumente
- Sicherstellung ausreichender, breit angelegter Forschung und Entwicklung
- Off. Unterstützung der Markteinführung neuer marktnaher Energietechniken

## Die Szenarien der Enquete-Kommission (1)

- Referenzszenario
  - Fortschreibung der derzeitigen Energiepolitik
  - Auslaufen der Kernenergienutzung
  - Keine Vorgabe von Klimaschutzzielen

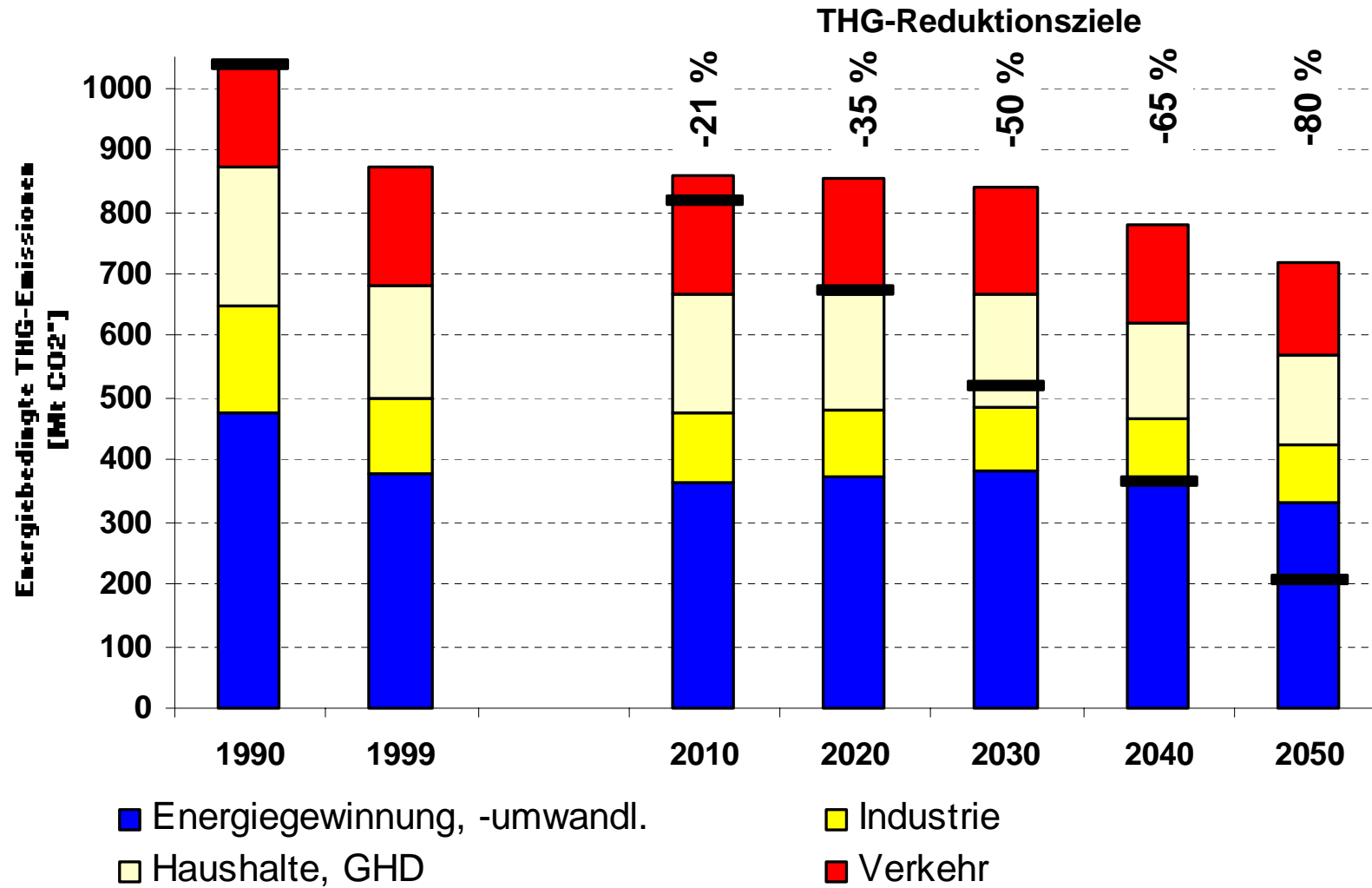
Zielszenarien: Reduktion der THG Emissionen um 50 % bis 2030 bzw. 80 % bis 2050 gegenüber 1990

- Umwandlungseffizienz (UWE)
  - Effizienzsteigerung beim Einsatz fossiler Energieträger
  - Abtrennung und Deponierung von CO<sub>2</sub> möglich
  - Ausweitung KWK (40 % KWK-Strom in 2050)
  - Verstärkte Energieeinsparung
  - Auslaufen der Kernenergienutzung

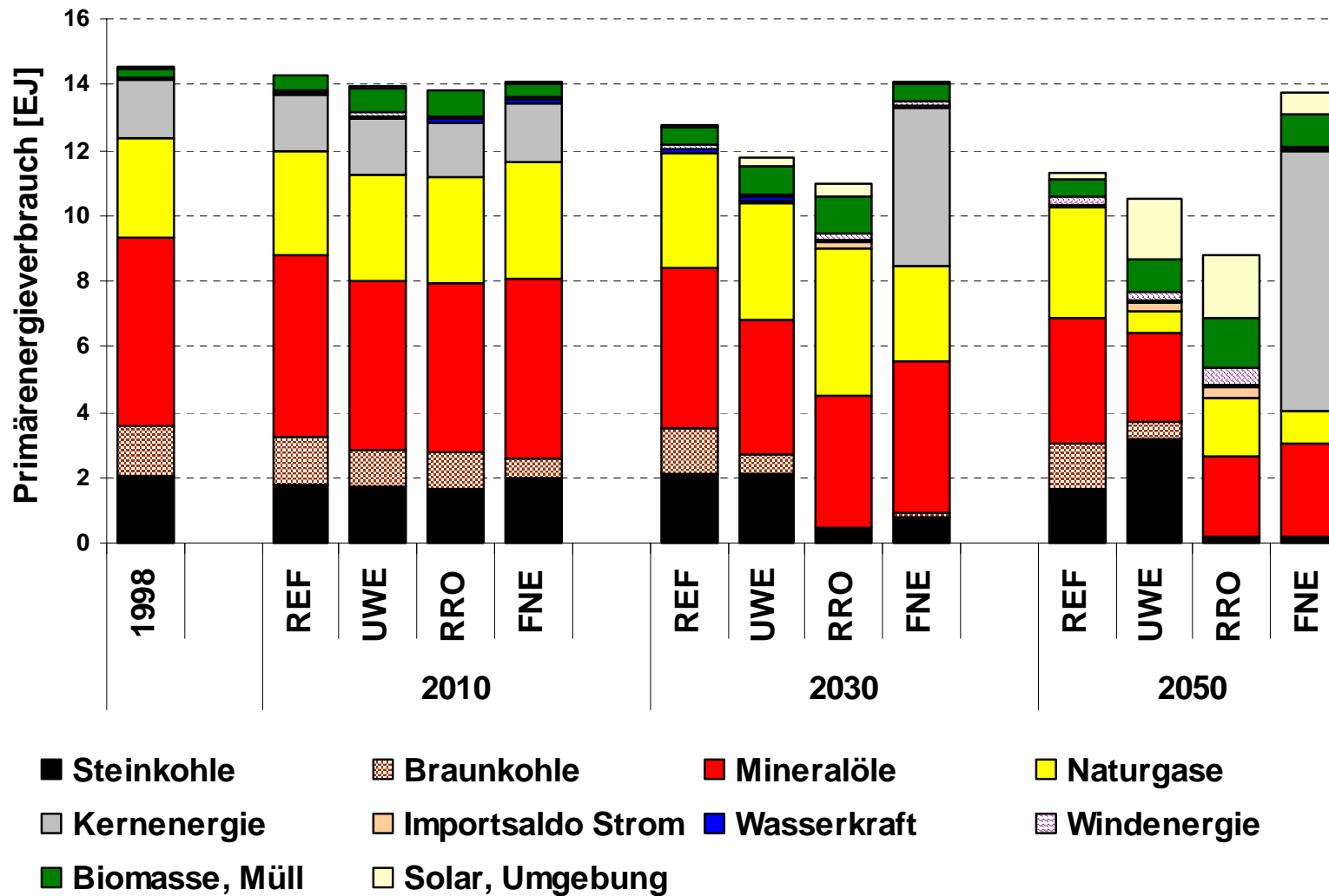
## Die Szenarien der Enquete-Kommission (2)

- REG/REN-Offensive (RRO)
  - Versorgung basiert auf Erneuerbaren Energien (mindestens 50 % der Stromerzeugung und des Energieverbrauchs im Jahr 2050)
  - Verstärkte Energieeinsparung
  - Zurückdrängung des motorisierten Straßengüter und -personenverkehrs
  - Auslaufen der Kernenergienutzung
  
- Fossil-nuklearer Energiemix (FNE) (Ressourcennutzungseffizienz)
  - Kosteneffiziente Erreichung der Reduktionsziele
  - Nutzung von Energieeinsparung und CO<sub>2</sub>-Minderungsoptionen entsprechend ihrer Minderungseffizienz
  - Weitere Nutzung und Ausbau der Kernenergie möglich

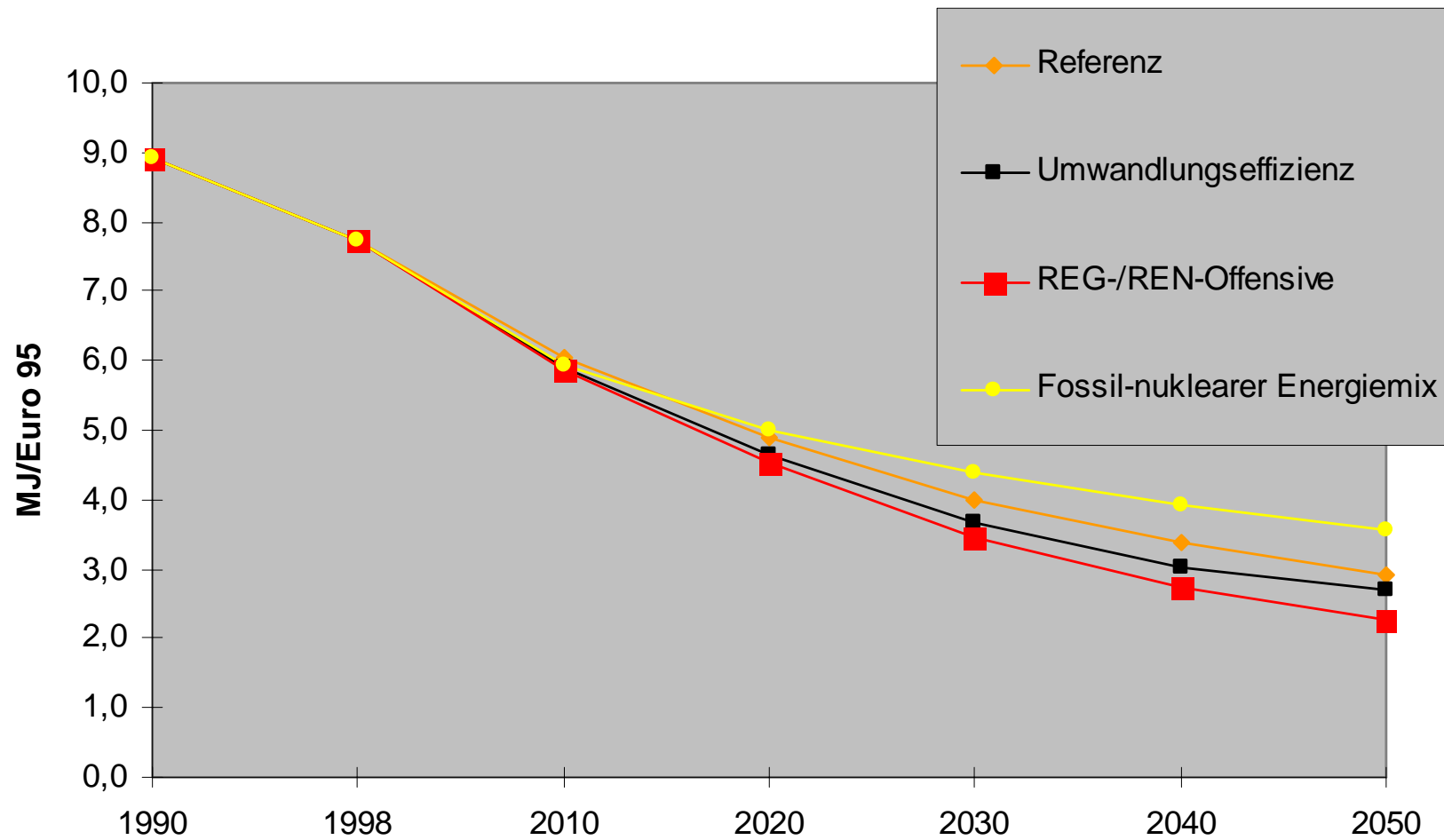
## Energiebedingte Treibhausgasemission im Referenzszenario



## Entwicklung des Primärenergieverbrauchs nach Energieträgern

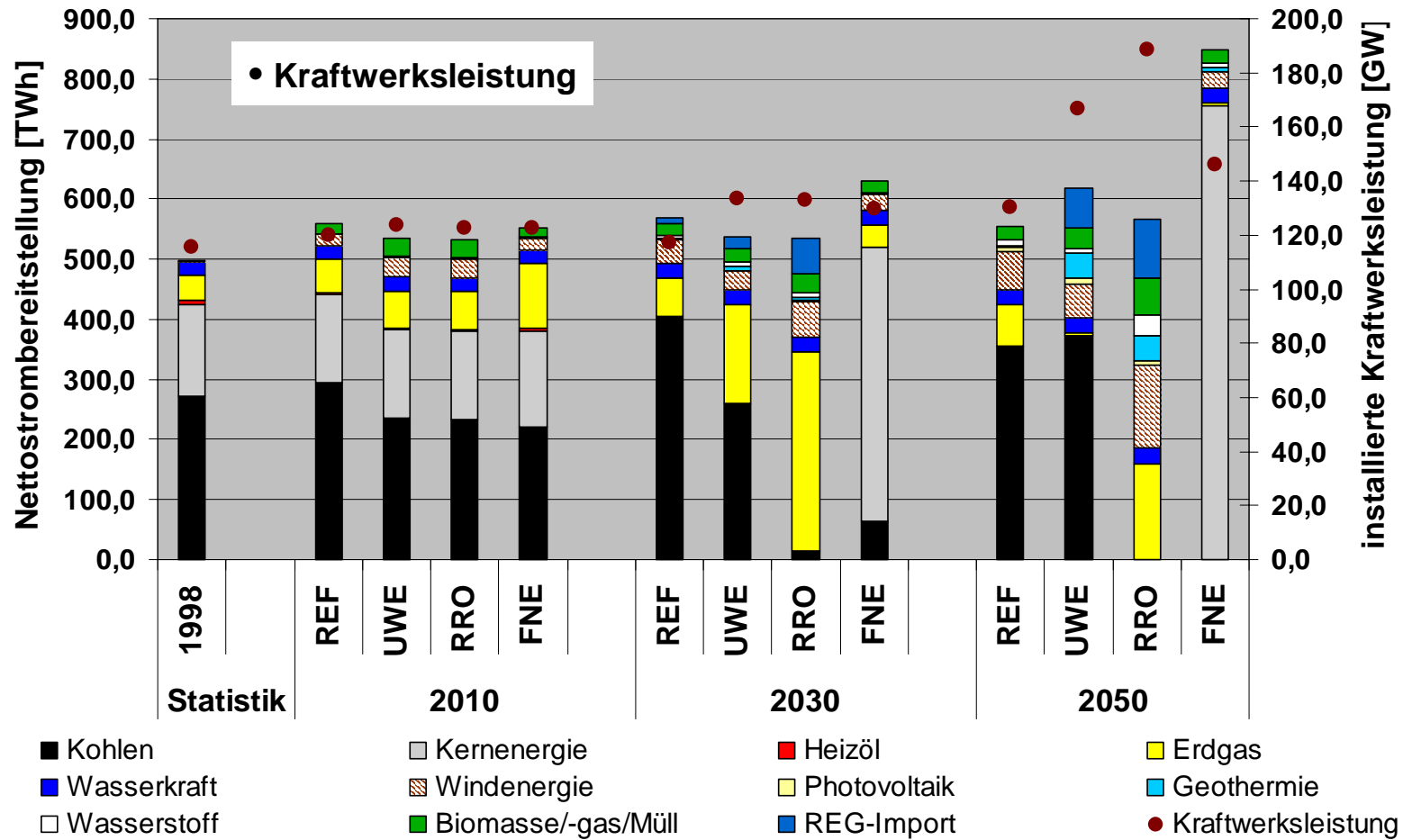


## Entwicklung der Energieintensität des Bruttoinlandsproduktes





## Klimaschutz und politische Rahmenbedingungen – Auswirkungen auf die zukünftigen Stromerzeugungsstrukturen



## Kosten der Treibhausgas-Minderung im Vergleich

### Mehrkosten der CO<sub>2</sub>-Minderung je Haushalt im Vergleich zum Szenario Fossil-nuklearer Energiemix (FNE) in Euro<sub>98</sub> je Haushalt und Jahr

Szenario	2020	2030	2050
Umwandlungseffizienz (UWE)	230	512	1253
REG-/REN-Offensive (RRO)	340	769	2025

### Mehrkosten der THG-Minderung je t CO<sub>2</sub>\* im Vergleich zum Szenario Fossil-nuklearer Energiemix (FNE) in Euro<sub>98</sub> /t CO<sub>2</sub>

Szenario	2020	2030	2050
Umwandlungseffizienz (UWE)	49	61	83
REG-/REN-Offensive (RRO)	73	91	134

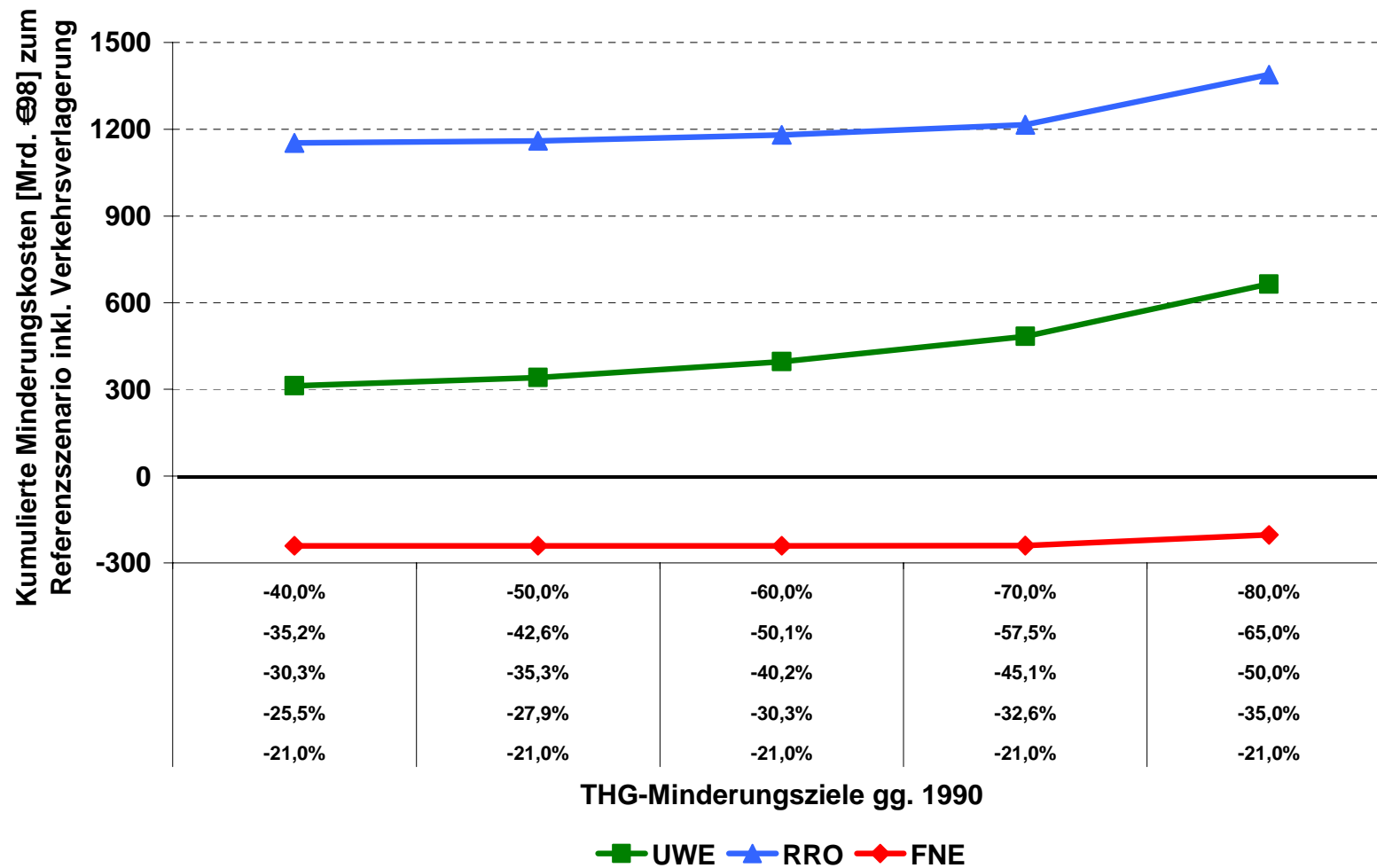
## Marginale Treibhausgas-Minderungskosten der Zielszenarien in Euro<sub>98</sub>/ t CO<sub>2</sub>

Szenario	2020	2030	2050
Umwandlungseffizienz (UWE)	22	60	450
REG-/REN-Offensive (RRO)	17	120	585
Fossil-nuklearer Energiemix (FNE)	0,15	19	160

## Energieseitige Kosten zur Erreichung der Treibhausgasminderungsziele

<b>Kostendifferenz zum Referenzszenario in Mrd. Euro<sub>98</sub></b>	
<b>Szenario</b>	<b>Kumulierte Minderungskosten bis 2050</b>
Umwandlungseffizienz (UWE)	593
REG/REN-Offensive (RRO)	1.279
Fossil-Nuklearer Energiemix (FNE)	-236

## Kumulierte Treibhausgasminderungskosten in Abhängigkeit von den Minderungszielen (inklusive der Bewertung der Verkehrsverlagerung)



## **Fazit – für die Zukunft der Energieversorgung**

- weitgehende Minderungen der THG-Emissionen auch bei Verdopplung des Bruttoinlandsproduktes möglich
- Maßnahmen und Wege zur THG-Minderung im Energiebereich werden Kosten bestimmen; max. Größenordnung 1500 Mrd. Euro<sub>98</sub> im Jahr 2050
- Effizienzsteigerungen bei der Energieanwendung und –bereitstellung, sowie Kernenergie sind die wichtigsten Optionen für kosten-effiziente Minderung der THG-Emissionen
- neue erneuerbare Energien werden erst in einigen Jahrzehnten einen größeren Beitrag zur Energieversorgung leisten können
- Weitere Nutzung von - dann weitestgehend emissionsfreien - Kohle- und Erdgaskraftwerkstechnologien möglich
- Ausweitung der Nutzung von Strom und Fernwärme geboten, Wasserstoff behält untergeordnete Bedeutung
- Konsequente Ausschöpfung aller „No-Regret“ Maßnahmen zur Minderung von THG-Emissionen ermöglicht schon jetzt Erreichen weitgehender Klimaschutzziele